Beiträge zur Kenntnis

der

morphologischen Wirksamkeit der Meeresströmungen.

Teil I.

INAUGURAL-DISSERTATION

zur

Erlangung der Doktorwürde

genehmigt von der

philosophischen Fakultät

der

Friedrich-Wilhelms-Universität zu Berlin.

Von

ALFRED RÜHL

aus Königsberg i. Pr.

Tag der Promotion: 5. August 1905.

REFERENTEN:

Professor Dr. Freiherr von Richthofen.
Professor Dr. Branco.

Mit Genehmigung der hohen Fakultät kommt hier nur der erste Teil der ganzen Arbeit zum Abdruck. Der Rest wird in den »Veröffentlichungen des Instituts für Meereskunde und des Geographischen Instituts an der Universität Berlin« im Verlage der Königlichen Hofbuchhandlung von E. S. Mittler & Sohn in Berlin erscheinen.

E. S. MITTLER & SOHN
KÖNIGLICHE HOFBUCHDRUCKEREI
BERLIN SW12, KOCHSTRASSE 68—71.

Um das Problem der Bildung von Schwemmlandküsten zu studieren, hat sich der Verfasser im Herbst 1903 nach Friaul und Venetien begeben. Er hat die Küste von Istrien bis Venedig hin kennen gelernt, die Tätigkeit der Flüsse studiert und besonders eingehend die Gegend zwischen Triest, Grado und Görz durchwandert. Das Phänomen setzt allerdings der unmittelbaren Beobachtung außerordentliche Schwierigkeiten entgegen. Der Verfasser war daher nicht in der Lage, diese Arbeit auf eigene Beobachtungen aufzubauen, und mußte sich darauf beschränken, diese Erscheinungen aus eigener Anschauung kennen zu lernen, während er für die Bearbeitung des Gegenstandes im wesentlichen auf die vorhandene Literatur angewiesen blieb.

Historischer Überblick.

Oftmals in der Geschichte der Wissenschaften kann man die Tatsache beobachten, daß eine Theorie, die eine Reihe von Tatsachen verständlich macht, später, wenn man erkannt hat, daß sie zur Erklärung aller fraglichen Punkte nicht ausreicht, nicht etwa modifiziert, sondern gänzlich verworfen wird. So ist es Schwanns Theorie der Gärung ergangen, die man auf die Autorität Liebigs hin verließ, ein gleiches Schicksal haben die descendenztheoretischen Anschauungen Lamarcks erlitten, die von Cuvier mit Erfolg bekämpft und niedergeschlagen wurden, und eine ähnliche Geschichte weisen auch die Meeresströmungen hinsichtlich der Theorien über ihre morphologische Wirksamkeit auf.[1])

Der unmittelbaren Anschauung liegt es nahe, den Strömungen des Meeres eine hohe Bedeutung bei der Umgestaltung der Küsten zuzuschreiben. So ist es erklärlich, daß diese Ansicht bereits vor mehreren Jahrhunderten auftauchte, und zwar geschah dies zuerst durch den Venetianer Geminiano Montanari.[2]) Er behauptete, die Wellenbewegung er-

[1]) Einen historischen Überblick bietet Cialdi in seinem großen Werke: Sul moto ondoso del mare, 1866, jedoch nach einzelnen »Schulen« geordnet.

[2]) Montanari, Il mare Adriatico e sua Corrente esaminate, 1715. Eine kurze Darstellung seiner Lehre findet sich z. B. bei Mercadier, Recherches sur les ensablements des ports de mer, 1788, S. 15 ff.

strecke sich nur auf ganz geringe Tiefen, der Grund für die Anlandungen, speziell an der venezianischen Küste, sei einzig und allein in den Strömungen zu suchen; durch die dicht an der Küste den Boden aufwühlenden Wellen würden sie hierin unterstützt. Diese Anschauungen Montanaris, die sogar ein Gegner, Brighenti, eine »ingegnosissima ipotesi« nennt,[1]) haben denn in der folgenden Zeit Wissenschaft und Technik beherrscht; noch am Anfang des 19. Jahrhunderts war die Theorie der Sandanhäufungen auf demselben Punkte stehen geblieben, wo er sie gelassen hatte.[2]) Die Mittel, die man angab, um der zunehmenden Versandung der Häfen zu steuern, gründeten sich stets auf die Behauptung Montanaris, daß an der Mündung eines Flusses stilles, totes Wasser entsteht, so daß der von den Strömungen mitgeführte Sand dort zu Boden fällt. In der Herstellung einer kräftigen Strömung und Spülung an dieser Stelle sahen z. B. Mercadier und Frémond de la Merveillère die einzige Abhilfe hiergegen.[3])

Wie es aber oft geschieht, daß die Epigonen die ursprüngliche Lehre ins Maßlose übertreiben, so auch hier. Man hatte ja von der Natur der Meeresströmungen zu jener Zeit und noch weit später nur sehr unvollkommene und zum Teil ganz falsche Vorstellungen. Man hielt sie für vollkommen continuierlich, gleichsam für Ströme im Meere, noch Alexander von Humboldt nennt sie »wahre ozeanische Flüsse«.[4]) Ja, so sehr war man hiervon überzeugt, daß der Italiener Vincenzo di Luccio es unternahm, die Strömungen des adriatischen Meeres für die verschiedenen Monate zu beschreiben, und ihre Geschwindigkeit und ihren Verlauf für jede einzelne Stunde des Tages anzugeben.[5]) Und Semilasso machte den ganz ernsthaften Vorschlag, man solle diese Strömung zur Briefbeförderung benutzen.[6])

In dem Zeitalter der neptunistischen Theorie glaubte man natürlich mehr denn je an die ungewöhnliche Kraft und Stärke der Meeresströmungen;[7]) vor allem gilt dies von den Wirkungen, die sie durch Erosion hervorrufen sollten. So vertritt z. B. Kant die Ansicht, daß die Meeresströmungen die »Form und Physiognomie« der Küsten bedinge. Durch

---

[1]) Brighenti, Corrente litorale dell' Adriatico. Mem. Accad. delle sc. dell' Istit. di Bologna, 1857, Bd. 8, S. 486.

[2]) Emy, Mouvement des ondes, 1831, S. 92.

[3]) Mercadier a. a. O. Frémond de la Merveillère, Mémoire sur les Ensablemens, 1788.

[4]) Humboldt, Kosmos (Gesammelte Werke, Bd. 1), Bd. 1, S. 224.

[5]) Luccio, Trattato delle Correnti, 1798. Übersetzung bei Le Gras, Manuel de la navigation dans la mer Adriatique, 1855, S. 46 ff.

[6]) Böttger, Das Mittelmeer, 1859, S. 176.

[7]) Krug, Kartographie der Meeresströmungen. Deutsche geogr. Blätter, 1901. Bd. 24, S. 112 f.

das Anprallen des Stromes gegen die östliche Seite der Kontinente seien hier eine Menge von Inseln entstanden, und ebenso sei dies auch der Grund für die Zuspitzung der Festländer im Süden.[1]) Noch weiter ging Delaméthrie. Nach ihm sind überhaupt die meisten Formen des festen Landes unter der Mitwirkung der Meeresströmungen entstanden; sie »durchfurchen die Ebenen und höhlen Täler aus«,[2]) und Chambrier schreibt einem von den Vogesen herkommenden Strome gar die Ablagerung der schweizerischen Nagelfluh zu![3]) Die Hypothese, daß die westindischen Inseln, wie ihre langgestreckte Gestalt zeigt, durch die Antillenströmung vom Kontinente losgerissen, und dann in einzelne Inseln aufgelöst seien, findet noch Alexander von Humboldt »den Grundsätzen der positiven Geologie angemessen«.[4])

So spielten denn die Meeresströmungen in den Lehren der Geologen noch bis in die Mitte des 19. Jahrhunderts hinein eine sehr bedeutende Rolle. Sowohl Lyell, der die Tätigkeit der Strömungen der der festländischen Flüsse völlig analog findet[5]) und ihnen daher große geologische Bedeutung beimißt,[6]) als auch de la Bêche[7]) widmen ihnen in ihren Werken eingehende Betrachtungen. Ähnlich faßt auch Delesse die Erosion und den Transport durch Strömungen auf.[8]) Sie schleppen den feinen Sand fort und lagern ihn dort ab, wo ihre Geschwindigkeit sich vermindert oder gleich null wird. Und da der Schlamm bedeutende Zeit beansprucht, um sich im Wasser niederzuschlagen, so kann auf diese Weise eine Verschleppung auf weite Entfernungen hin erfolgen. Und Gustav Bischof sagt, nachdem er die Sand- und Schlammhäufungen in der Nähe großer Flüsse betrachtet hat: »Fern von Flußmündungen kann man Sandsteinbildungen begreifen, wenn man an die Strömungen denkt.«[9]) Gerade die Strömung des Mittelmeeres ist ihm ein »schlagendes Beispiel« hierfür,[10])

---

[1]) Kant, Physische Geographie, bearb. von Schelle, Bd. 1, S. 188.

[2]) Delaméthrie, De l'action des courans à la surface du globe. Journ. de physique, chimie . . . . 1808, Bd. 56, Aout, S. 87.

[3]) Chambrier, Recherches sur les montagnes d'alluvions on poudingues de la Suisse. Journ. de physique, chimie . . . . Messidor an XIII, Bd. 61, S. 251.

[4]) Humboldt, Kritische Untersuchungen. Übers. von Ideler. Neue Ausg., 1852, Bd. 1, S. 76.

[5]) Lyell, Principles of Geology, 10. ed., 1867/68, Bd. 1, S. 502.

[6]) Lyell, a. a. O. Bd. 1, S. 573.

[7]) de la Bêche, Geological Manual, 3. ed., 1833, S. 114 ff., ders., Researches in theoretical Geology, 1834, S. 72 f., ders. The Geological Observer, 2. ed., 1853, S. 46ff.

[8]) Delesse, Lithologie des mers de France, S. 115.

[9]) Bischof, Lehrbuch der chemischen und physikalischen Geologie, 1863/66, Bd. 3, S. 150.

[10]) Ebenda, Bd. 1, S. 485.

dem Unterstrom an der Straße von Gibraltar schreibt er selbst den Transport großer Geschiebe zu.[1]) Die Untersuchungen der Coast Survey führten Agassiz zu dem Ergebnis, daß die Halbinsel Florida ganz jungen Ursprungs sei, daß ihre Entstehung vornehmlich auf Korallenbauten zurückzuführen sei.[2]) Da nun die Korallen nur auf seichtem Grunde sich anzusiedeln vermögen, so mußte ihnen zuerst eine Unterlage für ihre Bauten geschaffen werden. Agassiz und Le Comte nahmen daher an, daß der Golfstrom das Material hierzu herbeischaffe, da seine Geschwindigkeit sich beim Austritt aus der Floridastraße bedeutend vermindert, so daß der Detritus dort niedersinken muß. Klöden glaubte sogar, in der Strömung des adriatischen Meeres einen Grund für das behauptete Sinken der dalmatinischen Küste gefunden zu haben. Die Strömung wird hier nach rechts abgelenkt und drängt an die Küste. Das Wasser dringt dann seitlich in die Zwischenräume der Schichten ein und lockert sie, so daß diese im Laufe der Zeit ihrer Unterlage beraubt werden. Auf diese Weise sollen lokale Senkungen entstehen können.[3]) In der Wasserbautechnik war es vor allem der Italiener Paleocapa, der immer wieder und wieder für die Richtigkeit der Montanarischen Hypothese eintrat.[4]) Die Strömung arbeitet zwar nicht mit großer Gewalt und Heftigkeit, dafür jedoch ununterbrochen und stetig.[5])

Paleocapa geriet nun in einen heftigen Streit mit Cialdi, Brighenti[6]) und vielen anderen, die eine Mitwirkung der Strömung auf das entschiedenste bestritten. Jedoch bereits einige Jahrzehnte früher hatte die Reaktion gegen die herrschende Theorie begonnen. Denn man hatte erkannt, daß die Meeresströmungen jene angenommene Continuität nicht besitzen, daß sie in Geschwindigkeit, Breite, Ausdehnung und Mächtigkeit sehr schwankende Gebilde seien. Diese Bewegung wurde eingeleitet

---

[1]) Bischof, Lehrbuch der chemischen und physikalischen Geologie, 1863/66, Bd. 3, S. 151.

[2]) Report on the History and Progress of the American Coast Survey up to the year 1858, S. 70.

[3]) Klöden, Eine Ursache des Sinkens der Küsten. Petermanns geogr. Mitt., 1871, Bd. 17, S. 175.

[4]) S. bes. Paleocapa, Considérations sur les plages et les ports de l'Adriatique. In: Ferd. de Lesseps, Percement de l'Istme de Suez, 2. Sér., Paris 1856, S. 167—195; und Sulla corrente litorale dell' Adriatico. Mem. R. Istit. Lombardo di scienze . . . , 1862, Bd. 8, S. 131—159.

[5]) Paleocapa, Sulla corrente litorale, S. 151.

[6]) Brighenti, Corrente litorale dell' Adriatico. Mem. Accad. delle sc. dell' Istit. di Bologna, 1857, Bd. 8, S. 485—511; 1861, Bd. 11, S. 119—134. Il nuovo Cimento, 1859, Bd. 10, S. 20—44; 1861, Bd. 14, S. 78—96. Ricerche geometriche ed idrometriche, 1862.

durch Emy,[1]) der die Theorie der Grundwellen aufstellte. Diese bilden sich beim Auflaufen des Wassers auf seichtem Grunde und unterscheiden sich hauptsächlich darin von anderen Wellen, daß die einzelnen Wasserteilchen eine fortschreitende Bewegung ausführen. Dadurch erhalten sie ein Fortschaffungsvermögen, und Emy glaubte daher in ihnen die wahre Ursache der Versandungen entdeckt zu haben. Zwar hatten schon vorher sich Stimmen gegen die Montanarischen Anschauungen geltend gemacht — hatte doch schon 1830 Tadini sie »ein unschuldiges Zeichen der Unwissenheit« genannt —[2]) aber man hatte nicht vermocht, etwas einigermaßen Gleichwertiges an ihre Stelle zu setzen. Der Vorkämpfer der neuen Richtung wurde dann der bereits genannte Cialdi, der mit großem Erfolge die Lehren Emys weiter ausbaute.[3]) Er leugnete den Sedimenttransport durch Strömungen genau so radikal, wie man ihn in früherer Zeit behauptet hatte. Nur für die allerkleinsten staubähnlichen Tonteilchen will er ihre Mitwirkung allenfalls gelten lassen.[4]) Die Strömungen seien sowohl qualitativ als auch quantitativ gar nicht imstande, größere Effekte hervorzurufen.

Ähnliche Ansichten haben dann späterhin gerade von geographischer Seite zahlreiche Verfechter gefunden. Im Jahre 1886 veröffentlichte Pechuël-Lösche auf Grund von Forschungen während der deutschen Loango-Expedition eine Arbeit, betitelt: »Flachküsten, Meeresströmungen und Brandung«.[5]) Die Anschwemmungen und Nehrungen an der westafrikanischen Tropenküste führt er nicht auf die an der Küste vorbeiziehende Strömung, sondern einzig und allein auf die in jenen Gegenden äußerst heftige Brandung zurück. Daß der seitliche Transport durch die Wellen die alleinige Ursache der Sedimentverschleppung sei, ist dann vor allem von Philippson ausgesprochen worden.[6]) Die Wellen laufen nie ganz senkrecht auf den Strand, stets werden sie ihn unter einem gewissen Winkel treffen; da sie aber immer senkrecht zur Küste sich zurückziehen, entsteht eine zickzackförmige Bewegung, an denen die einzelnen Sand- und Schlammteilchen

---

[1]) Emy, Du mouvement des ondes, 1831.

[2]) Tadini, Di varie cose alla idraulica scienza appartenenti, 1830.

[3]) Cialdi, Sintesi di fatti per dimostrare come il moto ondoso del mare è la cagione precipua del protendimento delle spiaggie, 1860. — Sul moto ondoso del mare, 1866. — Movimenti del mare, Il Politecnico, 1876, Bd. 24, S. 156ff.; 1877, Bd. 25, S. 54ff.

[4]) Cialdi, Sul moto ondoso del mare, 1866, S. 293.

[5]) Güssfeldt, Falckenstein, Pechuël-Lösche, Die Loango-Expedition, 1879/82. Bd. 3, 1. Hälfte, S. 33ff. Pechuël-Lösche, Flachküsten, Meeresströmungen und Brandung, Globus, 1886, Bd. 50, S. 39—42, 55—57,

[6]) Philippson, Küstenformen der Insel Rügen. Sitz.-Ber. niederrhein. Ges. für Natur- u. Heilkunde in Bonn, 1892, Bd. 49, Allg. Sitzungen, S. 71f. — Typen der Küstenformen. Richthofen-Festschrift, 1893, S. 23ff. — Das Mittelmeergebiet, 1904, S. 71f., 87.

teilnehmen, so daß sie auf diese Weise eine seitliche Verschiebung erfahren. Das Material wandert also stets in der Richtung des vorherrschenden Windes. Auf demselben Standpunkt stehen Weule[1]), Krümmel und viele andere, und ebenso eine Reihe von Wasserbautechnikern, wie z. B. das neue Werk von Shield.[2])

Dennoch halten einige Forscher die Ansicht, daß den Strömungen eine bestimmte Rolle beim Transport schwebender Teilchen, und damit bei der Bildung der Flachküsten zukomme, aufrecht. Diese Richtung wird vertreten durch Andrews[3]), Gilbert[4]), von Richthofen[5]), Penck[6]), Fischer[7]), de Lapparent[8]), und in letzter Zeit namentlich von Gulliver[9]). Dieser unterscheidet bei den »Forelands« — ein Ausdruck, mit dem die Amerikaner ganz allgemein die Anschwemmungen bezeichnen — drei Arten: current-, tidal-, und delta-forelands, ignoriert also die Tätigkeit der Wellen vollständig. Gulliver drückt sich allerdings leider fast stets ganz apodiktisch aus, er geht auf den Zusammenhang der einzelnen Erscheinungen nicht ein. Auch die beiden bedeutendsten wasserbautechnischen Werke, von Hagen[10]) und Sonne-Franzius[11]), lassen die Strömungen als wichtige geologische Agentien gelten.

Gegen Gulliver ist dann Tarr aufgetreten, der die durch die Wellen gebildeten Forelands, die wave-formed cuspate forelands, für den häufigsten, wenn nicht den allein vorkommenden Fall erklärt.[12]) Einen ähnlichen Standpunkt nimmt auch Wilson[13]) ein, und ebenso bestreitet Rovereto[14]), der Verfasser des ersten zusammenfassenden Werkes über Küsten, jede

---

[1]) Weule, Beiträge zur Morphologie der Flachküsten. Zeitschr. f. wiss. Geogr., 1891, Bd. 7, S. 211—256.

[2]) Shield, Principles and Practice of Harbour Construction, 1895, S. 71.

[3]) Andrews, North American Lakes. Trans. Chicago Acad. of Sc. Bd. 2. 1869.

[4]) Gilbert, On the Topografic Features of Lake Shores. 5. Ann. Rep. of the U. S. Geol. Surv. 1883/84, p. 69.

[5]) von Richthofen, Führer für Forschungsreisende, 1885, Neudruck 1901, S. 343 ff., 369.

[6]) Penck, Morphologie der Erdoberfläche, 1894, Bd. 2, S. 485 ff.

[7]) Fischer, Küstenveränderungen im Mittelmeergebiet. Zeitschr. d. Ges. f. Erdkunde, Berlin, 1878, Bd. 13, S. 160. — Entwicklungsgeschichte der Küsten. Peterm. geogr. Mitt. 1885, Bd. 31, S. 409. — Küstenstudien aus Nordafrika. Ebenda, 1887, Bd. 33, S. 1.

[8]) de Lapparent, Traité de Géologie, 1900, 4. éd., Bd. 1, S. 244f.

[9]) Gulliver, Cuspate Forelands. Bull. Geol. Surv. of Amer., 1896, Bd. 7, S. 399. — Shoreline Topography, Proc. Amer. Acad. of Arts and Sc., 1899, Bd. 34, S. 151.

[10]) Hagen, Handbuch der Wasserbaukunst. 1878, 2. Aufl. 3. Teil, Bd. 1, S. 215ff.

[11]) Franzius und Sonne, Der Wasserbau, 1901, 3. Aufl., S. 142.

[12]) Tarr, Wave-formed Cuspate Forelands. Amer. Geologist, 1898, Bd. 22, S. 1.

[13]) Wilson, Cuspate Forelands. Journ. of Geology, 1904, Bd. 12, S. 106.

[14]) Rovereto, Geomorfologia delle coste, 1903, S. 22ff.

Mitwirkung der Strömungen. Nansen[1]) dagegen und Schott[2]) weisen den Strömungen eine ganz bestimmte Rolle bei der Umgestaltung der Küsten zu.

Im Jahre 1888 stellte der Amerikaner Haupt eine Hypothese auf, die bei den beteiligten Kreisen äußerst lebhafte Diskussionen hervorrief.[3]) Er betrachtet die Flutströmungen, »floodcomponent«, als die wichtigsten Faktoren bei der Bildung der Barren, und schreibt den Wellen nur eine untergeordnete Rolle zu. Die Windwellentheorie darf seiner Ansicht nach nicht verallgemeinert werden, da sie eine ganze Reihe von Beispielen nicht zu erklären vermag. Daß jene Theorie so allgemein angenommen ist, hat seinen Grund darin, daß dem Beobachter die Wirkungen der Stürme sich deutlich sichtbar machen, während die Effekte der Gezeitenströmungen erst nach einer längeren Zeit sich geltend machen können. Unter den Gegenden, bei denen die Windwellentheorie versagen soll, führt Haupt besonders die Küsten von Long Island und von Mexiko und die Ufer des Michigan-Sees an. An der Nordseite von Long Island wandert das Material nach Westen, an der Südküste nach Osten, während man doch an beiden Stellen dieselbe vorherrschende Windrichtung annehmen muß. Ähnlich liegen die Verhältnisse am Michigan-See: im Westen, südlich von Milwaukee, ist die transportierende Bewegung südwärts, nördlich davon jedoch nordwärts gerichtet. Hier wird das Material durch Strömungen transportiert, die oberflächlichen Oscillationen ihre Entstehung verdanken. In der Great Southern Bay im Golf von Mexiko findet die Sandverschleppung in südwestlicher Richtung statt, während die Hauptwinde gerade entgegengesetzt gerichtet sind.

Das Aufsehen, das diese neue Theorie hervorrief, war so groß, daß ein »Report« verfaßt wurde, in dem man erklärte, Haupts Ansichten könnten nur ein theoretisches Interesse beanspruchen, sie seien nicht durch irgend welche Beobachtungen gestützt. Hierauf hat Haupt im folgenden Jahre geantwortet und versucht, die Gründe, die gegen seine Anschauungen geltend gemacht wurden, mit den oben angeführten Beispielen zu entkräften.[4])

---

[1]) Nansen, The Norwegian North Polar Expedition 1893, 1904, S. 139.

[2]) Schott, Physische Meereskunde, 1903, S. 155f.

[3]) Haupt, Physical Phenomena of Harbor Entrances. Proc. Amer. Philos. Soc., 1888, Bd. 25, S. 19. — Littoral movements of the New Jersey Coast. Trans. Amer. Soc. of Civil Engineers, 1890, Bd. 23, S. 123.

[4]) Discussion on the Dynamic Action of the Ocean in Building Bars. Proc. Amer. Philos. Soc., 1889, Bd. 26, S. 146.

Theoretische Einwände gegen die morphologische Wirksamkeit der Meeresströmungen.

Die Anhänger der Windwellentheorie haben nun zunächst bestritten, daß die Strömungen des Meeres vermöge ihrer Konstitution und wegen der Verhältnisse, unter denen sie sich befinden, imstande seien, Material zu transportieren, allenfalls mit Ausnahme der allerfeinsten Flußtrübe.

Bewegung der Wassermassen in der Strömung.

So hat Pechuël-Lösche auf die Art der Bewegung in den Meeresströmungen hingewiesen.[1]) Das Strömen vollzieht sich hier gänzlich anders wie in einem Flusse. Der Fluß strömt von der Höhe nach der Tiefe, er besitzt also ein Gefälle, er staut sich an den Krümmungen, er erleidet durch Reibung an den Seitenwänden und am Boden eine Verzögerung, und hieraus resultiert ein Durcheinanderwälzen der Wassermassen. Es entstehen vor allem aufsteigende Wirbel, denen man eine große Bedeutung beim Transport suspendierter Körper beimißt.[2]) Gänzlich anders sind die Verhältnisse bei einer Meeresströmung. Sie besitzt kein nennenswertes Gefälle, kein festes Bett, ist gewissermaßen uferlos, sie stößt sich nicht an starren Gegenständen, die sich ihr entgegenstellen, sondern vermag sich auszubreiten. Es kann daher kein Durcheinanderwirbeln der einzelnen Wasserteilchen stattfinden. Gleichmäßig fließt sie dahin, befindet sich also für in ihr schwebende Gegenstände in vollkommener Ruhe, so daß deren Niedersinken in keiner Weise gestört wird.

Die angeführten Tatsachen sind entschieden richtig, aber daraus den Schluß zu ziehen, daß die einzelnen Wasserteilchen bei der Strömung in relativer Ruhe zu einander verharren, ist doch wohl nicht erlaubt. Denn die Geschwindigkeit der Strömung ist keine gleiche, sie ist größer in den oberen Teilen als am Boden, größer in der Mitte als an den Rändern. Es entstehen auf diese Weise Kräfte, die die oberen, respektive mittleren Teile zu verzögern, die unteren, respektive seitlichen zu beschleunigen bestrebt sind. Es wird auf diese Weise auch bei einer Strömung eine Verschiebung der Wasserteilchen gegen einander hervorgerufen, die allerdings natürlich weit weniger bedeutend ist als bei einem Flusse. Eine völlig gleichmäßige, homogene Strömung ist wohl denkbar, in Wirklichkeit werden jedoch stets Kräfte auftreten, die die Homogenität zu stören suchen.

---

[1]) Pechuël-Lösche, Flachküsten etc., S. 40.
[2]) Penck, a. a. O., Bd. 1, S. 305.

Grosse Entfernung der Strömungen von der Küste.

Pechuël-Lösche führt weiter an, daß die Strömungen meist in so großer Entfernung von der Küste wären, daß sie für deren Ausgestaltung nicht in Frage kommen könnten. Bei derjenigen Strömung, die später etwas genauer betrachtet werden soll, der des adriatischen Meeres, ziehen die Schiffe nach den Angaben des großen Portolano von Marieni[1]) von ihr den größten Vorteil, wenn sie in einem Abstand von 3 Miglien = 5,4 km von der Küste segeln. Die Distanz ist jedoch je nach der Konfiguration der Küste bedeutenden Änderungen unterworfen. In der Nähe von Vorsprüngen ist die Strömung auf größere Entfernungen hin kaum merkbar, in Buchten von weiter Öffnung sind die Wasserteilchen selbst 10 Miglien = 18 km vom Gestade entfernt noch nicht im Zustande der Ruhe.

Die Flüsse vermögen mitunter ihre Sedimente weit in das Meer hinauszutransportieren, da in Meeren, die gezeitenlos sind, oder in denen die Gezeiten keine größere Bedeutung besitzen, eine Vermischung des Flußwassers mit dem Meerwasser erst in einer gewissen Entfernung von der Küste stattfindet. Da nämlich das Flußwasser spezifisch leichter ist, so breitet es sich zunächst in Gestalt eines außerordentlich flachen Kegels aus, um sich erst in größerer Entfernung und nach längerer Zeit mit dem Seewasser zu vermischen.[2]) Davy, der bei Georgetown Messungen des spezifischen Gewichts des Meereswassers an einer Flussmundung angestellt hat, gibt zu, daß die reine blaue Farbe des Ozeanwassers erst 80 Seemeilen vom Lande entfernt sichtbar wurde.[3])

Lorenz hat über die Abhängigkeit der Gestalt des Süßwasserkegels von der Größe des Querprofils, der Wassermenge und Geschwindigkeit des Flusses sehr exakte Beobachtungen an den nordadriatischen Küstenflüssen ausgeführt.[4]) Er untersuchte in Istrien die Mundungsgebiete der Narenta, Kerka und Cettina, von Flüssen mit steilem Böschungsabfall, und am gegenüberliegenden Schwemmlandufer das der Etsch, an deren Mundung sich der Meeresboden ganz allmählich senkt. Es zeigte sich nun zunächst darin ein Unterschied, daß bei der Narenta und Cettina das Flußwasser durch das salzige Wasser mehr in die Höhe gedrängt wird, so daß die obere, leichtere Schicht eine große horizontale Ausdehnung gewann, während bei der Etsch der Übergang von dem weniger in den mehr gesalzenen Zustand

[1]) Marieni, Portolano del mare Adriatico, 1845, S. 7.

[2]) Penck, a. a. O., Bd. 2. S. 497 f.

[3]) Davy, On the Specific Gravity of the Water of the Sea off the Coast of British Guiana. The Edinburgh New. Philos. Journ., 1848, Bd. 44, S. 45.

[4]) Lorenz, Brackwasserstudien an den adriatischen Küsten. Sitz.-Ber. K. Akad. d. Wiss. Wien. 1866, math.-nat. Klasse, Bd. 54. 2. Abt., S. 6.

mehr nach vorne als von oben nach unten erfolgte. Es vermag hier das schwerere Wasser sich nicht so kräftig unter das leichtere Flußwasser einzuschieben.

Was das Verhältnis der Länge des Süßwasserkegels zu den hydraulischen Qualitäten der Flüsse betrifft, so ergab sich, daß für die Gesamterstreckung des Kegels nur das Querprofil des Flusses bestimmend war, nur hier zeigte sich ein konstantes Verhältnis. Man sollte erwarten, daß Wassermenge und Geschwindigkeit von dem größten Einflusse seien; Lorenz nimmt daher an, daß deren Wirkung bereits in geringer Entfernung durch die Kräfte des Meeres aufgehoben würden.

Das benetzte Querprofil der Etsch gibt Lorenz zu 2850 Quadrat-Fuß = 273,6 qm an, die Erstreckung des untersalzigen Wassers[1]) zu 6200 Klaftern = 11,780 km, wobei noch eine Strecke von 1200 Klaftern = 2,28 km nicht berücksichtigt ist, wo das spezifische Gewicht zwischen 1,020 und 1,027 schwankte. Da nun z. B. die Isonzo- oder Tagliamento-Mündung ungefähr dieselbe Breite besitzt wie die der Etsch, aber etwa die doppelte Tiefe aufweist, so wird hier das Süßwasser wohl noch auf eine größere Entfernung hin, theoretisch auf eine viermal so große, seinen Einfluß ausüben. Man braucht aber nicht einmal so bedeutende Distanzen anzunehmen, da die Strömung, wie gesagt, am kräftigsten in einer Entfernung von 5,4 km von der Küste entwickelt ist. Der Schluß dürfte also gerechtfertigt sein, daß die feineren Sedimente, die die Flüsse dem Meere zuführen, auch in den Bereich der Strömung gelangen.

Verschiedenes Verhalten der Sedimente in Süß- und Salzwasser.

Dasjenige Moment jedoch, auf welches bei der Betrachtung der Transportfähigkeit der Meeresströmungen das größte Gewicht gelegt worden ist, war die Beobachtung, daß Sedimente in salzigem Wasser wesentlich rascher ausfallen als im Süßwasser.[2]) Man sollte ja eigentlich annehmen, daß das Seewasser vermöge seines höheren spezifischen Gewichts und seiner größeren inneren Reibung Teilchen sehr viel länger

[1]) Lorenz unterscheidet: eine oberste Schicht von wenigen Millimetern Mächtigkeit, Brackwasser bei 1,001—1,010, angesüßtes oder halbsalziges Wasser bei 1,010, aber 1,020 nicht erreichend, und volles Salzwasser bei 1,020 Dichte. a. a. O., S. 12. — Mill (Physical Conditions of Rivers entering a Tidal Sea. Proc. R. Soc. of Edinburgh, 1886, Bd. 13, S. 485) nennt Wasser mit einem Salzgehalt bis 0,5% frisch, bis 2% brackisch, über 2% salzig.

[2]) S. die zusammenfassende Arbeit von Weule, Zum Problem der Sedimentbildung. Ann. d. Hydrogr., 1896, Bd. 24, S. 402.

suspendiert erhalten könne als Flußwasser. Dies schien sich auch zunächst zu bestätigen, da man fand, daß das Meerwasser an den Mündungen großer, sedimentreicher Flüsse viele Meilen weit getrübt war. Aber bei Experimenten zeigte sich genau das Entgegengesetzte.

Die ersten Untersuchungen liegen bereits ziemlich weit zurück, sie blieben jedoch völlig unbekannt und unbeachtet.[1]) Dann aber erschien in den siebziger Jahren des 19. Jahrhunderts eine ganze Reihe von Veröffentlichungen, die sich mit dem Problem beschäftigten. Die Literatur über diesen Gegenstand ist dann im Laufe der Zeit eine außerordentlich große geworden, da eine ganze Anzahl von Wissenschaften, Physik, Chemie, Geographie, Geologie und Wasserbautechnik an ihm interessiert sind.

Diese ersten Experimente von Schloesing,[2]) Waldie,[3]) Hunt,[4]) Durham,[5]) Ramsay,[6]) Skey,[7]) Robertson,[8]) u. a. waren aber nicht exakt und umfassend genug, und wirklich sorgfältige Beobachtungen verdankt man erst den beiden Amerikanern Brewer[9]) und Barus[10]) und Thoulet.[11]) Als hauptsächlichstes Resultat ergab sich, daß der Absatz feiner Sedimente im Salzwasser eine Beschleunigung erfährt, die um so größer ist, je stärker die Lösung ist. Die Temperatur übt in der Weise einen Einfluß aus, als bei höherer Temperatur der Niederschlag weit schneller erfolgt als

---

[1]) Meade, Sidell, Report to Captain Talcott. In: Humphreys and Abbot Report on the Physics and Hydraulics of the Missisippi River, 1861, S. V—XIX.

[2]) Schloesing, Précipitation des limons par des solutions salines très-étendues. Compte — R. Acad. d. Sc., 1870, Bd. 70, S. 1345.

[3]) Waldie, On the muddy Water of the Hugli. Journ. Asiatic Soc. of Bengal, 1873, Bd. 42, Part II, S. 210.

[4]) Hunt, The Deposition of Clays. Proc. Boston Soc. of Nat. Hist., 1874. Bd. 16, S. 302.

[5]) Durham, Suspension of Clay in Water. The Chemical News, 1874, Bd. 30, S. 57. Proc. of the R. Phys. Soc. of Edinburgh, 1878, Bd. 4, S. 46. Suspension, Solution and Chemical Combination. The Chemical News, 1878, Bd. 37, S. 47.

[6]) Ramsay, On the Influence of various Substances in Accelerating the Precipitation of Clay suspended in Water. Quart. Journ. Geol. Soc., 1876, Bd. 32, S. 129. Philos. Magazine, 1876, 5. Ser., Bd. 1, S. 328.

[7]) Skey, Coagulation and Precipitation of Clay by Neutral Salts generally. The Chemical News, 1868, Bd. 17, S. 160.

[8]) Robertson, Precipitation of Clay in Fresh and Salt Water. Trans. Glasgow Geol. Soc., 1874, Bd. 4, S. 257.

[9]) Brewer, Suspension and Sedimentation of Clays. Amer. Jour. of Sc., 1885, 3. Ser., Bd. 29, S. 1.

[10]) Barus, Subsidence of Fine Solid Particles in Liquids. Amer. Jour. of Sc., 1889, 3. Ser., Bd. 37, S. 122. Bulletin of the U. S. Geol. Surv., 1886, Nr. 36.

[11]) Thoulet, Expériences sur la sédimentation. Ann. des mines, Mémoires, 1891, 8 Sér., Bd. 19, S. 5.

bei niedrigerer, da ja die Viscosität bei steigender Temperatur abnimmt. Hinsichtlich der Gründe dieser eigenartigen Erscheinung stehen sich auch heute noch die Meinungen gegenüber.

Es sind nun gerade in neuester Zeit wieder Untersuchungen hierüber angestellt worden, und zwar von zwei der bekanntesten englischen Wasserbautechniker, Vernon-Harcourt[1]) und Wheeler.[2]) Sie haben zu sehr bemerkenswerten und übereinstimmenden Ergebnissen geführt. Vernon-Harcourt hat seine Beobachtungen gerade im Hinblick auf die Bedeutung, die dem Gegenstande von geographischer und geologischer Seite beigelegt wird, gemacht. Auch Beyer hat hierüber Versuche angestellt (Untersuchungen über Umlagerungen an der Nordseeküste, 1901, S. 45). Um die völlige Ohnmacht der Meeresströmungen zur Verschleppung von Sedimenten zu demonstrieren, nimmt er als Beispiel eine Sinkgeschwindigkeit von 1 m in 1 Sekunde und eine Strömungsgeschwindigkeit von ebenfalls 1 m in der gleichen Zeit, ein Fall, der natürlich völlig unmöglich ist.

Die Sedimente einer ganzen Reihe von Flüssen wurden untersucht, und zwar auf ihr Verhalten gegen die mannigfachsten Lösungen hin. Vernon-Harcourt hat eine Tabelle aufgestellt, aus der hier das Wichtigste mitgeteilt sei. Die Maße sind, der einfachen Zahlen halber, nicht umgerechnet worden.

Fall in Minuten auf 1 Fuß

Substanz	Hugli	Rhône	Donau	Dniepr	Mississippi	Nil
Seewasser, ges. Lösg.	$7^1/_2$	7	$6^2/_3$	4	9	10
Seewasser, 1,024—1,018	23	24	26	12	30	13
Themse-Wasser	27	25	34	13	36	20
Destill. Wasser	56	32	65	20	57	3 Tage
Natr.-Carb.-Lösung	30	45	51			
Natr.-Chlor.	23	29	28			
Calc.-Bitarb.	26	27	31			

Es ergibt sich, daß der Ausfall der Teilchen in keiner andern Lösung so rasch erfolgt wie in gesättigter Salzwasserlösung, daß sich gewöhnliches Seewasser hierin nur wenig von seinem Hauptbestandteil, Chlornatrium, unterscheidet. Das Auffallende ist das Verhalten dem Themsewasser gegenüber. Die Flüsse weisen ja auch einen bestimmten Gehalt an gelösten Stoffen auf, vor allem an Calciumbicarbonat. Und wie vorauszusehen, zeigte sich, daß der Schlamm des Hugli, der Donau usw. dieselbe Zeit zum Ausfallen im Wasser der Themse brauchte, wie in Calciumbicarbonatlösung. Aber überraschend war die Tatsache, daß die

[1]) Vernon-Harcourt, On the Action of Seawater in accelerating the Deposit of River-Silt. Minutes of Proc. of the Jnst. of Civil Engineers, 1900, Bd. 142. S. 272.

[2]) Wheeler, The Settlement of Solid Matter in Fresh and Salt Water. Nature, 1901, Bd. 64, S. 181. — The Sea Coast, 1903, S. 62 ff.

Flußsedimente sich in Meerwasser in fast genau derselben Zeit niederschlugen wie in Süßwasser, daß also ein so beträchtlicher Unterschied, wie man bisher annahm, zwischen beiden Substanzen nicht besteht. Hierfür hat Vernon-Harcourt auch eine Erklärung zu geben versucht. Der Schlamm, den er zu seinen Experimenten benutzte, war von dem Boden der Flüsse genommen, während z. B. Sidell mit der allerfeinsten Flußtrübe operierte, die von der Oberfläche des Mississippi stammte. Nur beim Nil hatte auch Vernon-Harcourt mit Schlammproben von der Oberfläche des Flusses experimentiert, und diese zeigen denn auch ein abweichendes Verhalten. Der Nilschlamm fiel etwa doppelt so schnell aus, als der der übrigen Flüsse, er brauchte dagegen in destilliertem Wasser sogar drei Tage, um sich niederzuschlagen. Auf das allerfeinste Material vermag allerdings das Salzwasser eine Beschleunigung auszuüben, wie auch die von Wheeler aufgestellten Tabellen zeigen;[1]) diese ist aber bei weitem nicht so groß wie man bisher angenommen hatte, man kann ihr daher auch jene große Bedeutung nicht beimessen.

Geringe Geschwindigkeit der Strömungen.

Es wird endlich noch auf einen letzten Umstand hingewiesen, der die Meeresströmungen unfähig machen soll, Sedimente zu transportieren, das ist ihre geringe Geschwindigkeit, wenigstens was die lokalen Strömungen betrifft. Die großen ozeanischen Strömungen besitzen allerdings ganz bedeutende Geschwindigkeiten. Sie beträgt z. B. beim Golfstrom nach dem Austritt aus der Floridastraße 3 Seemeilen in der Stunde d. h. 1,5 m in 1 Sekunde, sie erreicht aber häufig noch viel höhere Werte; soviel beträgt aber etwa die Oberflächengeschwindigkeit großer Ströme an ihrer Mündung.[2]) Unter Zugrundelegung einer Geschwindigkeit von 1,5 m pro Sekunde und unter der Annahme einer Fallgeschwindigkeit der Teilchen von 2 Fuß in einer Stunde berechnete Lyell, wie weit Sedimente durch den Golfstrom transportiert werden könnten.[3]) Es ergibt sich, daß sie in 28 Tagen einen Weg von 2000 Seemeilen zurückzulegen vermögen, wobei sie nur um 224 Faden sinken. Es ist dabei natürlich vorausgesetzt, daß die Strömungsgeschwindigkeit bis zum Boden konstant bleibt, was in Wirklichkeit nicht der Fall ist. Ähnliche theoretische Berechnungen wie Lyell hat auch Babbage angestellt.[4])

[1]) Wheeler, a. a. O.

[2]) von Richthofen, a. a. O. S. 147.

[3]) Lyell, a. a. O., Bd. 1, S. 501.

[4]) Babbage, On the Action of Oceancurrents in the Formation of the Strata of the Earth. The Quart. Journ. Geol. Soc., 1856, Bd. 12, S. 366.

Verglichen mit diesen großen Geschwindigkeiten ist allerdings diejenige lokaler Strömungen, wie wir sie in Nebenmeeren finden, recht gering. Nach Marienis[1]) Angaben, auf die die meisten späteren zurückgehen, beträgt sie im adriatischen Meere längs der venezianischen Küste 3—4 Meilen in 24 Stunden, das sind 6—8 cm in 1 Sekunde. Die gleichen Zahlen hat bereits Montanari angegeben[2]), dasselbe gilt von Prina.[3]) Brighenti hat allerdings bei Montanari unter Zugrundelegung eines anderen Längenmaßes geringere Werte, 5—6 cm pro Sekunde herausgerechnet;[4]) aber nach Paleocapa dürfte sich Montanari wohl der Seemeile als Maß bedient haben.[5]) Diese Geschwindigkeit ist allerdings bedeutenden Schwankungen unterworfen,[6]) bei günstigem Winde, bei Bora, soll die Strömung im Golf von Venedig 1 Seemeile in der Stunde zurücklegen.[7]) Ihre Breite beträgt längs der dalmatinischen Küste durchschnittlich 18—20 km,[8]) ihre Tiefe wird bei Istrien zu 10—14 Faden angegeben.[9])

Über die physikalischen Bedingungen des Schwebens von kleinen Teilchen im Wasser hat in neuester Zeit Wolfgang Ostwald Untersuchungen angestellt, die allerdings im Hinblick auf planktonische Organismen gemacht wurden, aber auch allgemeine Gültigkeit besitzen.[10]) Damit ein Körper im Wasser sinkt, ist notwendig, daß er spezifisch schwerer ist als dieses, also ein Übergewicht besitzt. Jedoch nicht alle spezifisch gleich schweren Körper sinken gleich schnell, denn das Sinken wird beeinflußt durch die Oberfläche und Gestalt des Körpers und die Natur der Flüssigkeit. Ostwald fand nun für den Vorgang des Sinkens die einfache Formel:

$$\text{Sinkgeschwindigkeit} = \frac{\text{Übergewicht}}{\text{Innere Reibung} \times \text{Formwiderstand.}}$$

Auf die innere Reibung der Flüssigkeit hat die Temperatur einen großen Einfluß; mit steigender Temperatur nimmt sie ab, und zwar für

---

[1]) Marieni, a. a. O., S. 7.

[2]) Montanari, a. a. O., S. 64.

[3]) Prina, Il pilota pratico alla costa occidentale dell' Adriatico, 1816, S. 8.

[4]) Brighenti, Mem. Acc. delle sc. dell' Istit. di Bologna, 1857, Bd. 8, S. 487.

[5]) Paleocapa, Mem. R. Istit. Lomb. di sc., 1862, B. 8, S. 140.

[6]) Marieni, a. a. O., S. 7.

[7]) Le Gras, Manuel de la navigation dans la mer Adriatique, 1855, S. 40, General examination of the Mediterranean Sea, 1870, S. 174.

[8]) Viezzoli, L'Adriatico, 1901, S. 94.

[9]) Lorenz, Physikalische Untersuchungen im Quarnerischen Golfe, 1863, S. 138. Die neueste Ausgabe des Mediterranean Pilot (3. ed., 1899) sagt, daß die Strömung im Golf von Venedig 4—5 Faden, nach anderen Beobachtungen jedoch sogar bis zu 11 Faden tief sei. S. 23.

[10]) Ostwald, Zur Theorie des Plankton. Biol. Centralblatt, 1902, Bd. 22, S. 596. — Theoretische Planktonstudien. Zoologische Jahrb., Abt. f. System., Biologie etc., 1903, Bd. 18, S. 1.

1° etwa um 2—3 %. Daß diese Veränderungen eine bedeutende Einwirkung auf das Schweben auszuüben vermögen, hat Wesenberg-Lund am Plankton nachgewiesen.[1]) Er zeigte, daß die Planktonorganismen im Sommer, wo also wegen der höheren Temperatur die Viskosität abnimmt, ihre Schwebeapparate zu vergrößern streben. Ebenso ist von der deutschen Tiefsee-Expedition im tropischen atlantischen Ozean beobachtet worden, daß die Ceratien, bestimmte Planktonformen, bei plötzlichen Änderungen der Dichte des Meerwassers eine veränderte Gestalt annehmen.[2])

Der Formwiderstand setzt sich aus Oberflächengrösse und Gestalt zusammen. Es werden die Körper die geringste Sinkgeschwindigkeit besitzen, die den größten Querschnitt oder die größte Vertikalprojektion haben. Aber diese Faktoren sind nicht meßbar.

Es sind nun aber schon seit langer Zeit eine Menge von Beobachtungen und Versuchen angestellt worden über die Transportfähigkeit und diejenige Geschwindigkeit des Wassers, welche nötig ist, um Schlamm- oder Sandteilchen von bestimmter Größe fortzubewegen.[3]) Am bekanntesten sind wohl die Experimente du Buats geworden.[4]) Er bediente sich eines Troges aus Holz, auf dessen Boden verschiedene Substanzen gelegt wurden. Diesen Trog neigte er dann solange, bis sich das Material in Bewegung setzte. Er fand folgende Zahlen:

Brauner Töpferton setzte sich in Bewegung bei einer Geschwindigkeit des Wassers von 0,08 m in der Sekunde, feiner Sand bei 0,16 m.

Aus der Reihe der anderen Angaben seien die folgenden erwähnt:

Forbes[5]): Feuchte Ziegelerde 0,07 m in der Sekunde
Süßwassersand 0,21 „ „
Meeressand 0,33 „ „

Stevenson[6]): Es wird aufgehoben vom Boden
Ziegellehm bei einer Geschwindigkeit von 0,075 m in der Sekunde
Feiner Sand „ „ 0,15 „

---

[1]) Wesenberg-Lund, Von dem Abhängigkeitsverhältnis zwischen dem Bau der Planktonorganismen und dem spezifischen Gewicht des Süßwassers. Biol. Centralblatt, 1900, Bd. 20, S. 606.

[2]) Schott, Physische Meereskunde, 1903, S. 57.

[3]) Eine ausgezeichnete und sehr vollständige Übersicht bietet Hooker, The Suspension of solids in flowing water. Trans. Amer. Soc. of Civil Engineers, 1897, Bd. 36, S. 240 ff. S. auch Simpson, Rep. of the Chief of Engineers, 1875, Part II, S. 471.

[4]) du Buat, Principes d'hydraulique, 1786, Bd. 2, S. 95.

[5]) Forbes, Abrading Power of Water. Proc. R. Soc. of Edinburgh, 1856/57, Bd. 3, S. 474.

[6]) Stevenson, Canal and River Engineering, 1886, 3. ed. S. 362. Design and Construction of Harbours, 1886, 3. ed. S. 304. Dieselben Zahlen bei Harrison, Obstructions to Navigation in Tidal Rivers. Minutes of Proc. of the Institution of Civil Engineers, 1849, Bd. 8, S. 311.

Bouniceau[1]) gibt die Bodengeschwindigkeit an, bei der Erosion eintritt:

Für Schlamm 0,08—0,15 m in der Sekunde
„ groben Sand 0,22—0,30 „ „

Nach Sainjon[2]) wird fortbewegt:

Töpferton bei einer Geschwindigkeit von 0,081 m in der Sekunde
Sand „ „ 0,162 „ „

nach Telford[3]):

weiche Erde „ „ 0,076 „ „

Dieselbe vage Bezeichnung »weiche Erde« hat auch Kovatsch. Sie wird aufgehoben bei einer Geschwindigkeit von 0,15 m, Sand bei 0,305 m in der Sekunde.[4])

Es sei hier gestattet, auf die außerordentliche Ungleichmäßigkeit hinzuweisen, mit der die Begriffe „Sand", „Schlamm", „Lehm", „Ton" gebraucht werden. Es dürfte aber vielleicht in Zukunft doch eine einheitliche Benennung möglich sein, und zwar auf Grund der vor kurzer Zeit erschienenen Arbeiten von Atterberg.[5]) Diesem ist es nämlich gelungen, die willkürliche Abgrenzung in eine natürliche, d. h. auf physikalischen Grundlagen beruhende zu verwandeln. Seine Untersuchungen haben zunächst das Ergebnis geliefert, daß Teilchen mit einem größeren Durchmesser als 0,02 mm durch Salze und Säuren nicht mehr koagulierbar sind. Hierdurch ist eine erste Grenze gegeben. Eine zweite findet sich bei einem Körnchendurchmesser von 0,002 mm. Teilchen von diesem Durchmesser weisen noch, in Wasser aufgeschlemmt, unter dem Mikroskop eine eigentümliche, zitternde Bewegung, die sogenannte Brownsche Molekularbewegung, auf, während gröbere Körner nicht mehr bewegt werden. (Diese Brownschen Bewegungen, die zwar seit langer Zeit bekannt sind, aber immer noch keine völlige Aufklärung gefunden haben, werden nach neueren Forschungen wahrscheinlich durch innere Strömungen in der Flüssigkeit hervorgerufen. Die Teilchen sind in fortdauernder, unregelmäßiger Bewegung um eine Mittellage begriffen, sie können sogar, der Wirkung der Schwerkraft entgegen, in beträchtliche Höhe gelangen. Lehmann, Molekularphysik, Bd. 1, S. 264 ff.)

---

[1]) Bouniceau, Etude sur la navigation des rivières à marées, 1845, S. 19.

[2]) Sainjon, cit. bei Partiot, Sur les sables de la Loire. Ann. des ponts et chaussées, 1871, 5. Sér., Bd. 1, Memoires, S. 261.

[3]) Telford, cit. ebenda, S. 262.

[4]) Kovatsch, Die Versandung von Venedig, 1882, S. 108.

[5]) Atterberg, Die rationelle Klassifikation der Sande und Kiese. Chemiker-Ztg., Cöthen, 1905, Bd. 29, S. 194 ff.

Die neuesten Angaben stammen von Vernon-Harcourt.[1]) Es wird transportiert bei einer Geschwindigkeit von 0,075—0,15 m in der Sekunde Schlamm und Ton, bei 0,20 m in der Sekunde Sand.

Alle diese Bestimmungen weisen eine ziemlich gute Übereinstimmung auf. Bei allen Versuchen ist nun die Geschwindigkeit genannt, bei der ein Aufwirbeln, Aufheben der Teilchen vom Boden stattfindet. Es ist aber klar, daß, um einen solchen Effekt hervorzurufen, weitaus größere Geschwindigkeiten nötig sind, als zum Transport solcher Teilchen, die bereits suspendiert enthalten sind. Auf die Meeresströmungen lassen sich diese Zahlen übertragen, da sie hinsichtlich der Ablagerung und Fortführung der Sinkstoffe demselben Gesetz unterworfen sind, wie die Flüsse des Festlandes, dem einfachen Gesetz, daß jedes beliebige Material bei einer gewissen Stromgeschwindigkeit fortbewegt, bei einer geringeren liegen bleibt.[2]) Für die Strömungen kommt sogar noch ein günstiges Moment hinzu, die höhere innere Reibung. Die Strömung des adriatischen Meeres bewegt sich in einer Sekunde etwa um 8 cm fort. Da diese Geschwindigkeit aber mit der Tiefe abnimmt, so kann man 4 cm als durchschnittliche Geschwindigkeit annehmen. Der Schlamm, den der Rhône in das Meer führt, besitzt nach Vernon-Harcourt eine Sinkgeschwindigkeit von 0,2 mm in der Sekunde. Es beträgt dann die Zeit, in der die Teilchen 10 m, die durchschnittliche Tiefe des Meeres an der venetianischen Küste, gefallen sind, 14 Stunden. In derselben Zeit hat dann die Strömung einen Weg von etwa 2 km zurückgelegt. Ist das Teilchen dann aber auch zu Boden gesunken, so bleibt es doch nicht liegen; es wird von den Wellen erfaßt und der Strömung wieder zugeführt werden.

Abfegen des Meeresbodens durch die Strömung.

Den Boden des Meeres abzufegen, aufgeschüttete Massen vom Grunde emporzuwirbeln, dazu werden allerdings die Strömungen nur in ganz seltenen Fällen imstande sein. Die Geschwindigkeit einer Strömung ist umgekehrt proportional ihrem Querschnitt. Es wird sich also bei Verengerungen, wie sie z. B. in Meeresstraßen auftreten, eine bedeutende Steigerung der Geschwindigkeit einstellen. Unter solchen Umständen vermag vielleicht auch eine Strömung den Boden von feinerem Material

[1]) Vernon-Harcourt, Rivers and Canals, 1896, Bd. 1, S. 16.

[2]) Sonne-Franzius, a. a. O., S. 143.

zu säubern. So ist z. B. der Boden der Floridastraße in Tiefen von 150—600 m nur mit Sand bedeckt, während der feinere Schlamm gänzlich fehlt, woraus Verrill den Schluß zieht, daß dieser durch die Strömung fortgetragen sei.[1])

Im folgenden Teile wird an einem Beispiel, der nordadriatischen Schwemmlandküste, zu zeigen versucht, daß hier die Meeresströmung bei dem Transport der Sedimente und der Entstehung der Anschwemmungen mitwirkt.

Es wird zunächst eine Schilderung der venezianisch-friulischen Ebene, vor allem ihres Untergrundes, gegeben, und gezeigt, daß zu ihrer Erklärung die Windwellentheorie nicht ausreicht. Es folgt eine Beschreibung der Strömung im adriatischen Meere, eine Darstellung der Windverhältnisse in dessen nördlichem Teile und der jahreszeitlichen Verteilung der Schlammführung der Küstenflüsse. Es ergibt sich, daß im Sommer, in derjenigen Jahreszeit, in der die Flüsse hauptsächlich ihre Sedimente dem Meere zuführen, die vorwaltende Richtung des Windes eine der Strömung entgegengesetzte ist, daß also der Transport des Materials nicht ausschließlich durch die Wellen erfolgen kann. Ein ähnliches Bild weist auch die südfranzösische Küste auf, während sich in anderen Gegenden die Wirkungen von Wellen und Strömungen nur schwer scheiden lassen.

[1]) Verrill, Notice of the remarkable Marine Fauna occupying the outer banks off the Southern Coast of New England. Amer. Journ. of Sc., 3. Ser., Bd. 24, S. 449. — v. Richthofen a. a. O., S. 369.

Ich, Alfred Rühl, bin am 21. Juli 1882 zu Königsberg i. Pr. als Sohn des o. ö. Professors Dr. Franz Rühl und seiner Frau Elise geb. Henle geboren. Von Ostern 1891 besuchte ich das Kneiphöfische Stadtgymnasium zu Königsberg i. Pr., das ich Ostern 1900 mit dem Zeugnis der Reife verließ. Ich studierte Geographie von Ostern 1900 bis Herbst 1901 in Königsberg, von Herbst 1901 bis Herbst 1902 in Leipzig, seitdem in Berlin. Die Promotionsprüfung bestand ich am 19. Januar 1905. Während meiner Studienzeit besuchte ich die Vorlesungen und Übungen folgender Herren Professoren und Dozenten:

in Königsberg: Braun, Busse, Erler, Hahn, Händtke, Klinger, Lühe, Prutz, Rühl, Schellwien, Struve,

in Leipzig: Credner, Felix, Friedrich, Ratzel †, Weule, Wiener, Zirkel,

in Berlin: Ascherson, von Bezold, Branco, Holtermann, Jäkel, von Luschan, Meinardus, Paulsen, Freiherr von Richthofen, Schmoller, Stumpf, Wahnschaffe.

Allen diesen meinen hochverehrten Lehrern spreche ich auch an dieser Stelle meinen ehrerbietigsten Dank aus. Vor allem danke ich Herrn Geheimrat Dr. F. Freiherrn von Richthofen für die Anregung zu dieser Arbeit und das stete wohlwollende Interesse, mit dem er ihren Fortgang verfolgte.